

# 10 块新疆哈密沙漠陨石的类型及其岩石矿物学特征

赖永旺<sup>1,2</sup>, 王桂琴<sup>1\*</sup>

(1. 中国科学院 广州地球化学研究所 同位素地球化学国家重点实验室, 广东 广州 510640; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:** 沙漠是除南极地区之外的另一陨石样品的主要来源地。我国拥有面积辽阔的沙漠, 为陨石的收集提供了有利的地理条件。2013 年 5 月, 在首次新疆库姆塔格沙漠陨石考察中, 发现并收集到 46 块陨石样品, 确定了 3 个陨石富集区: Hami、Alatage Mountain (AM) 和 Kumtag。对其中的 10 块代表性陨石样品进行了岩石学研究, 在此基础上确定了它们的化学群、岩石类型、冲击变质程度和风化程度。10 块库姆塔格陨石均为普通球粒陨石, 其中 1 块样品 Kumtag014 (Fa 摩尔百分比为 9.1~48.3, 相对标准偏差 PMD 为 51.0; Fs 摩尔百分比为 2.8~30.3, PMD 为 54.2) 属于非平衡型 L 群。依据橄榄石 Fa 的 PMD 将其进一步划分为 3.4 亚型, 属于相当原始的球粒陨石样品。另外 9 块经历了明显的热变质作用, 为 5 型普通球粒陨石, 包括 7 块 L 群 (Fa 22.6~25.9, Fs 17.6~21.4) 和 2 块 H 群 (Fa 18.2~20.8, Fs 16.0~17.8)。这些陨石的冲击变质程度: 5 块 S3 型, 4 块 S2 型, 1 块 S1 型; 风化程度: 3 块 W1 型, 6 块 W2 型, 1 块 W3 型。

**关键词:** 沙漠陨石; 陨石分类; 岩石学; 矿物成分

中图分类号: P58; P185.83 文献标识码: A 文章编号: 0379-1726(2015)03-0301-10

## Classification of 10 meteorites from Hami in Xinjiang: Petrology and mineralogy

LAI Yong-wang<sup>1,2</sup> and WANG Gui-qin<sup>1\*</sup>

1. State Key Laboratory of Isotope Geochemistry, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract:** In addition to the Antarctic, desert is the main source of meteorites. China has a vast desert area which provides favorable geographical conditions for collection of meteorites. In total 46 meteorite samples were found and collected in Kumtag, Xinjiang in May 2013, and this is the first time for organized meteorites hunting in desert conducted by specialists. Three meteoritic concentration areas were ascertained in our search scope: Hami, Alatage Mountain (AM) and Kumtag. In this study, 10 representative meteorites were selected from these three areas, and were classified in terms of chemical group, petrographic type, shock stage and weathering scale based on their petrography and mineral chemistry. These ten desert meteorites were found to be all ordinary chondrite meteorites. Among them Kumtag014 (Fa 9.1~48.3, PMD 51.0; Fs 2.8~30.3, PMD 54.2) is an unequilibrated ordinary chondrite, belonging to L3.4 group, while the other nine equilibrated ordinary chondrites belong to type 5, covering L groups (Fa 22.6~25.9, Fs 17.6~21.4) for 7 samples and H groups (Fa 18.2~20.8, Fs 16.0~17.8) for 2 samples. The shock metamorphic stages for most chondrites are generally low: five being S3, four S2 and one S1. The weathering degrees for these chondrites are mostly limited: W1 for three of them, W2 for six and only one for W3.

**Key words:** desert meteorites; classification; petrography; mineral chemistry

## 0 引言

陨石是从行星际空间穿越大气层经过烧蚀后到

达地表的流星残留体, 保留了太阳系形成前后的物质组分, 是人类认知太阳系形成和演化的重要窗口<sup>[1]</sup>。南极和沙漠具有单一的颜色背景、较好的通视条件、干燥的气候条件和更少的人为破坏和覆盖, 是保存

收稿日期(Received): 2015-01-07; 改回日期(Revised): 2015-02-12; 接受日期(Accepted): 2015-02-13

基金项目: 国家自然科学基金重大项目(41490631)

作者简介: 赖永旺(1988-), 男, 硕士研究生, 地质工程专业。E-mail: 1028243598@qq.com

\* 通讯作者(Corresponding author): WANG Gui-qin, E-mail: guiqinwang@gig.ac.cn; Tel: +86-20-85290110

LAI Yong-wang et al.: Classification of 10 meteorites from Hami in Xinjiang: Petrology and mineralogy

和富集发现陨石的最佳地点。迄今为止, 南极收集到的陨石样品总数达 4 万余块<sup>[2]</sup>, 沙漠陨石的发现数量也在不断增加, 世界上已知的陨石约 25% 发现于沙漠地区, 近 70% 发现于南极冰原<sup>[3]</sup>。1989 年人类首次在非洲撒哈拉沙漠发现了许多集中分布的陨石样品, 为此民间的陨猎者于 1990、1991 年分别组织了两次撒哈拉沙漠陨石寻找和回收的野外考察, 收获颇丰<sup>[4]</sup>。国际上对非洲撒哈拉地区<sup>[5-6]</sup>、阿拉伯半岛<sup>[7]</sup>、澳大利亚西南荒漠地区<sup>[8]</sup>和美国的新墨西哥州<sup>[9]</sup>等地区数次成功的陨石搜寻和回收的野外考察获得了大量陨石样品, 表明了沙漠是仅次于南极的另一陨石富集区。

虽然我国具有广阔的沙漠面积, 包括塔克拉玛干沙漠、库姆塔格沙漠、古尔班通古特沙漠、巴丹吉林沙漠和腾格里沙漠等, 但有组织的沙漠陨石搜集工作一直没有展开。2008 年, 新疆陨石爱好者首先在新疆哈密库姆塔格沙漠发现陨石, 并于 2009 年获国际命名为库姆塔格陨石(Kumtag), 定为 H5 型<sup>[10]</sup>。2013 年 5 月, 由中国科学院地质与地球物理研究所、中国科学院广州地球化学研究所、中国科学院地球化学研究所和桂林理工大学等国内开展陨石研究的单位组成了我国第一个专业沙漠陨石考察队, 对该地区进行了首次专业的沙漠陨石搜寻。此次共回收得到 46 块陨石样品, 划分出 3 种化学-岩石类型: L3.4、L5 和 H5, 已申请国际陨石协会命名为: Kumtag014、AM001—AM042 和 Hami003—Hami005。此次考察在 4 个区域内( 、 、 和 )搜集到陨石, 并以此确定了 3 个陨石富集区: Alatage Mountain( )、Hami( 、 )和 Kumtag( )。这是我国沙漠陨石搜集工作的一个良好开端, 沙漠陨石考察计划的持续

开展和更多沙漠陨石富集区的确立, 将为国内沙漠陨石的回收工作提供参考, 提高稀有类型陨石样品回收的可能性。我国开展的沙漠陨石的发现和研究工作, 将会与南极陨石的研究工作一样取得大量原创性成果, 必将丰富研究样品的类型, 促进我国陨石学和天体化学的发展。

随着大量陨石样品的收集, 陨石分类成为陨石研究中的重要内容<sup>[11]</sup>。陨石分类是开展陨石深入研究工作的前提, 对了解和探索太阳星云凝聚与分馏作用、吸积形成陨石母体的过程, 不同类型陨石母体在太阳系形成的部位、形成的物理化学条件及形成类地行星的初始物质都具有重要的理论意义和参考价值。本次研究拟选取富集区域和类型上均具代表性的 10 块陨石样品开展化学组成、岩石结构和矿物成分的研究, 并进行二维(包括岩石学和矿物学特征)陨石类型的划分, 为这些陨石的进一步研究工作奠定基础。

## 1 样品与实验方法

本次研究的 10 块沙漠陨石编号分别为 AM007、AM008、AM011、AM015、AM020、AM027、Hami003、Hami004、Kumtag014 和 Hami005。这 10 块样品中, AM008、AM015 和 AM027 为浑圆状, 其余均为棱角状。AM007、AM015、Hami003、Hami004 和 Kumtag014 残留部分熔壳, AM011 和 Hami005 熔壳呈斑驳状, AM008 熔壳覆盖完整, AM020 和 AM027 几乎没有熔壳。10 块陨石均具有明显的球粒结构, 初步确定为普通球粒陨石。详细手标本信息见表 1。

表 1 10 块沙漠陨石的手标本信息  
Table 1 Sample information for the ten desert meteorites from Hami, Xinjiang

序号	样号	原始编号	发现位置		熔壳	质量(g)	形状
			北纬(N)	东经(E)			
1	AM007	130501007	41°41'13.0"	92°56'19.4"	部分残留	91	不规则棱角状
2	AM008	130501008	41°41'13.8"	92°56'19.3"	覆盖完整	19	椭圆形浑圆状
3	AM011	130501011	41°41'14.1"	92°56'18.5"	斑驳状	7	不规则棱角状
4	AM015	130501015	41°41'13.3"	92°56'16.0"	部分残留	83	椭圆形浑圆状
5	AM020	130501021	41°41'16.0"	92°56'16.4"	几乎没有	10	四面体棱角状
6	AM027	130501028	41°41'28.9"	92°56'24.1"	几乎没有	17	椭圆形浑圆状
7	Hami003	130504044	42°02'46.2"	93°53'14.5"	部分残留	152	不规则棱角状
8	Hami004	130504045	42°02'42.4"	93°53'2.47"	部分残留	99	不规则棱角状
9	Kumtag014	130505046	41°51'30.4"	93°13'36.3"	部分残留	693	不规则棱角状
10	Hami005	130506047	42°09'08.5"	93°26'2.06"	斑驳状	411	不规则棱角状

原始样品使用低速金刚石切割机(SYJ-160)进行切片,使用环氧树脂注胶后磨制光片,以上全部过程在无水条件下进行。光片在光学显微镜(OLYMPUS-BX51)下进行岩相观察,包括结构特征、不透明矿物的种类、含量和分布、冲击变质特征和风化程度。硅酸盐矿物成分由中国科学院广州地球化学研究所同位素地球化学国家重点实验室用电子探针(JEOL 8100)测定,不透明矿物成分由桂林理工大学用电子探针(JEOL 8230)测定,加速电压 15 kV、束流 20 nA,硅酸盐采用天然矿物标样,金属采用金属或氧化物标样。分析数据采用 ZAF(原子序数、吸收效应及荧光效应)法校正。

## 2 实验结果

### 2.1 岩石学特征

Kumtag014 陨石球粒含量大于 70% (体积浓度,

下同);边界清晰,呈圆形或次圆形;类型多样,以斑状球粒为主,其次为放射状球粒和炉条状球粒(图 1);大小不一,直径最大约为 3.2 mm,最小约为 0.1 mm,大部分为几百  $\mu\text{m}$ 。球粒之间的细粒基质为隐晶质,基质所占体积较小,没有发生重结晶,样品中没有观测到次生的长石。球粒的主要组成矿物是橄榄石和辉石,橄榄石颗粒完整。不透明矿物主要是铁镍金属和陨硫铁,约占 3.2%(体积浓度)。它们呈 3 种形式分布: Fe-Ni 金属和陨硫铁共同构成近浑圆的团块状(100~700  $\mu\text{m}$ ); Fe-Ni 金属和陨硫铁呈细小颗粒(10~40  $\mu\text{m}$ )并沿球粒周边分布;细小的 Fe-Ni 金属和陨硫铁颗粒随机分布在基质或球粒中。部分 Fe-Ni 金属边缘出现少量褐铁矿。

AM007(图 2a)、AM008、AM011、AM015、AM020、AM027 和 Hami004 这 7 块陨石的球粒分布不均匀,大部分球粒轮廓较模糊,局部球粒结构和轮廓仍可分辨,可见有放射状球粒、炉条状球粒,球

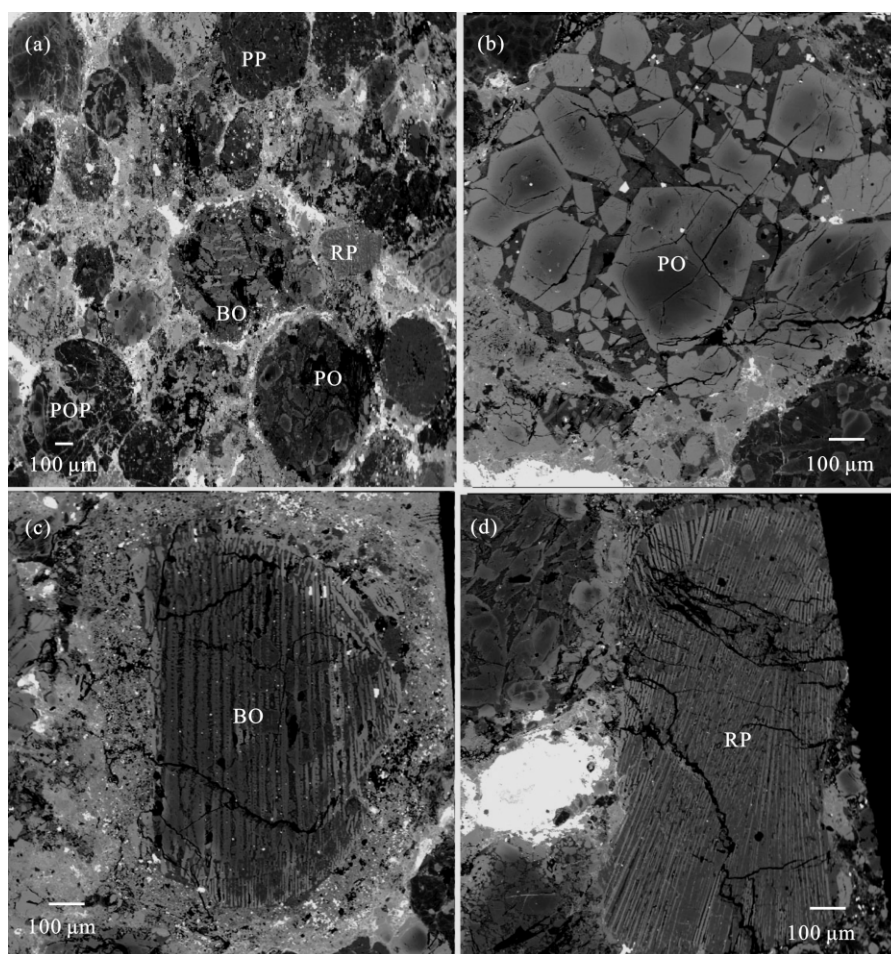


图 1 Kumtag014 陨石中的球粒

Fig.1 Microscopic characteristics for chondrules in Kumtag014 meteorite

背散射电子(BSE)照片。(a)球粒丰富,边界清晰,球粒种类多样。PO-斑状橄榄石球粒;PP-斑状辉石球粒;BO-炉条状橄榄石球粒;RP-放射状辉石球粒;POP-斑状橄榄石辉石球粒。(b)PO-斑状橄榄石球粒,橄榄石有明显环带结构,由中心到边部 Mg 含量降低,Fe 含量增加;(c)BO-炉条状橄榄石球粒。(d)RP-放射状辉石球粒

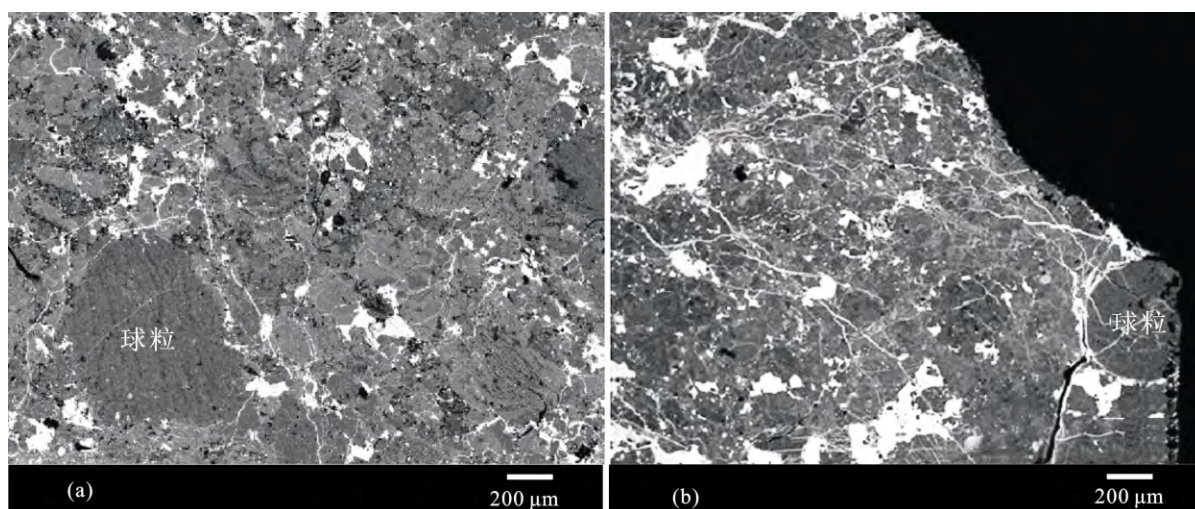


图2 5型普通球粒陨石的球粒

Fig.2 Characteristics of chondrules in type 5 ordinary meteorite from Hami, Xinjiang  
背散射电子(BSE)照片。(a)AM007(L5型)。(b)Hami003(H5型), 球粒模糊, 部分可分辨轮廓

粒直径一般小于 1 mm。基质中等重结晶, 主要组成矿物包括橄榄石、低钙辉石、次生斜长石、铁镍金属、陨硫铁和褐铁矿。7 块陨石的不透明矿物的含量(体积浓度)分别为 4.2%、4.5%、5.2%、5.1%、4.6%、4.2%和 6.5%。AM007、AM008 和 AM011 表面金属熔滴广泛分布; AM015、AM020、AM027 以及 Hami004 陨石橄榄石破碎, 没有发现金属熔滴。Hami004 陨石褐铁矿仅分布在 Fe-Ni 金属边缘; AM007、AM008、AM011、AM015 和 AM020 陨石部分 Fe-Ni 金属表面褐铁矿化; AM027 陨石褐铁矿沿裂隙发育, 部分 Fe-Ni 金属完全褐铁矿化。

Hami003(图 2b)和 Hami005 陨石大部分球粒模糊不清, 局部球粒轮廓仍可分辨, 可见斑状球粒和炉条状球粒或其碎块等。基质中等重结晶, 表面裂隙发育, 金属熔滴广泛分布。主要组成矿物与上述 7 块相同, 这两块陨石的不透明矿物的含量分别为 8.5%和 9.2%(体积浓度), Hami003 不透明矿物主要为 Fe-Ni 金属和陨硫铁, 有少量的褐铁矿分布在 Fe-Ni 金属边缘; Hami005 比 Hami003 有更高含量的褐铁矿, 部分 Fe-Ni 金属表面褐铁矿化。

## 2.2 矿物成分组成特征

10 块样品的橄榄石和低钙辉石以及铁纹石的矿物化学组成均使用电子探针进行分析测定, 测定结果见表 2 和表 3。

Kumtag014 陨石的橄榄石和辉石的化学组成很不均一, 橄榄石 Fa 值和辉石 Fs 值变化大。不仅

球粒之间的成分差异很大, 而且部分球粒内的铁镁质硅酸盐矿物也呈明显的环带特征(图 1b), 表现为橄榄石核部富 Mg, 边部富 Fe(图 3), 如核部的 Fa 值为 9.1, 边部的 Fa 值可以达到 33.59。不同橄榄石颗粒, 橄榄石的 Fa 值的变化范围在 9.1~48.3 之间, 平均值为 25.0, 其 PMD 值为 51.0。辉石矿物晶体环带不明显, 但 Fs 值的变化范围在 2.8~30.3 之间, 平均为 17.6, PMD 为 54.2。铁纹石 Co 含量(%)变化范围在 0.81~2.0 之间, 平均值为 1.1, PMD 为 38.0。

AM007、AM008、AM011、AM015、AM020

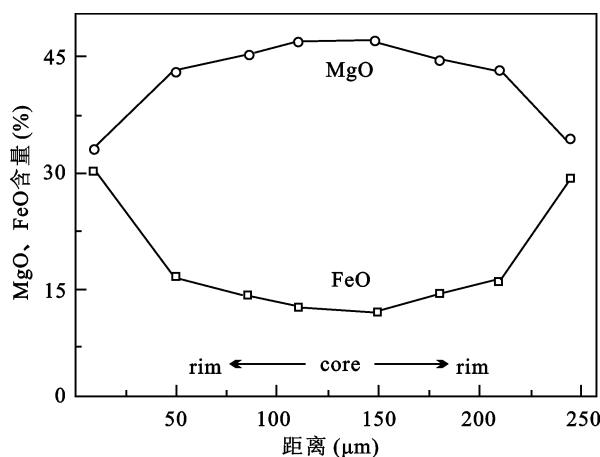


图3 Kumtag014 陨石中橄榄石颗粒剖面  
FeO-MgO 成分分布

Fig.3 Cross section of an olivine grain in Kumtag014 showing FeO and MgO variations  
橄榄石 FeO 含量由核部到边部逐渐升高, MgO 含量从核部到边部逐渐降低, 呈明显的环带特征

表 2 10 块沙漠陨石代表性橄榄石和低钙辉石的电子探针分析结果(%)

Table 2 Composition of olivine and low-Ca pyroxene in 10 desert meteorites from Hami, Xinjiang as analysed by electron microprobe

样号	矿物	点数(n)	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	NiO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	ZnO	V <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Total	Fa,Fs
AM007	橄榄石	6	37.7	0.02	0.09	0.60	22.0	0.45	38.4	0.06	0.04	0.01	0.17	0.03	0.06	0.02	99.6	24.1
	辉石	7	56.1	0.07	0.16	0.12	13.5	0.45	28.5	0.79	0.02	0.01	0.25	0.01	0.03	0.02	99.8	20.5
AM008	橄榄石	8	38.0	0.04	0.03	0.04	22.3	0.47	38.3	0.02	0.03	0.01	0.14	0.04	0.03	0.01	99.3	24.5
	辉石	8	56.1	0.12	0.21	0.21	13.2	0.47	28.2	0.84	0.05	0.02	0.12	0.01	0.02	0.01	99.5	20.4
AM011	橄榄石	8	37.8	0.05	0.01	0.05	22.1	0.47	39.0	0.03	0.03	0.01	0.06	0.03	0.02	0.01	99.5	23.9
	辉石	7	55.4	0.08	0.17	0.21	13.4	0.46	28.7	0.96	0.06	0.02	0.12	0.04	0.03	0.01	99.5	20.2
AM015	橄榄石	8	37.2	0.02	0.01	0.04	22.4	0.47	39.1	0.04	0.01	0.01	0.30	0.02	0.03	0.01	99.7	24.1
	辉石	8	55.7	0.08	0.16	0.14	13.4	0.48	28.7	0.91	0.04	0.01	0.19	0.03	0.03	0.01	99.9	20.3
AM020	橄榄石	8	37.7	0.02	0.01	0.04	22.5	0.47	38.4	0.05	0.03	0.01	0.16	0.05	0.04	0.02	99.5	24.5
	辉石	8	56.0	0.09	0.14	0.13	13.4	0.50	28.2	0.92	0.03	0.02	0.14	0.01	0.03	-	99.4	20.6
AM027	橄榄石	8	38.2	0.02	0.01	0.12	22.2	0.46	38.4	0.04	0.02	0.01	0.32	0.03	0.04	-	99.9	24.3
	辉石	8	55.5	0.07	0.19	0.20	13.3	0.49	28.2	0.83	0.04	0.01	0.24	0.01	0.03	0.01	99.1	20.4
Hami003	橄榄石	8	39.1	0.04	0.02	0.01	17.6	0.44	42.3	0.02	0.04	0.01	0.47	0.04	0.03	0.01	100	18.8
	辉石	8	56.2	0.10	0.19	0.20	11.0	0.51	30.5	0.61	0.04	0.01	0.26	0.02	0.04	0.02	99.6	16.5
Hami004	橄榄石	8	38.4	0.02	0.02	0.04	21.4	0.47	39.5	0.00	0.03	0.01	0.82	0.02	0.04	0.02	99.3	23.1
	辉石	8	56.3	0.04	0.27	0.25	12.2	0.40	29.7	0.44	0.04	0.02	0.09	0.02	0.04	0.01	99.6	18.5
Hami005	橄榄石	8	38.8	0.02	0.04	0.07	17.9	0.46	41.9	0.00	0.05	0.02	0.48	0.02	0.04	0.02	99.5	19.2
	辉石	8	56.5	0.09	0.16	0.14	11.3	0.49	30.0	0.80	0.03	0.00	0.15	0.01	0.03	0.01	99.7	17.0
Kumtag014	橄榄石	23	39.1	0.04	0.01	0.07	18.1	0.36	41.2	0.08	0.00	0.01	0.26	-	-	0.01	99.3	25.0
	辉石	10	56.1	0.04	0.33	0.67	12.7	0.40	29.3	0.18	0.08	0.02	0.44	0.01	-	-	99.2	17.6

注:“-”表示低于元素检测限

表 3 8 块沙漠陨石代表性铁纹石的电子探针分析结果(%)

Table 3 Composition of kamacite in 8 desert meteorites from Hami, Xinjiang as analysed by electron microprobe (%)

样号	点数(n)	P	S	Co	Ni	Si	Cr	Fe	Cu	Total
AM008	5	0.01	0.01	0.67	14.9	0.22	0.04	84.1	0.05	100
AM011	6	0.01	0.02	0.71	14.0	0.06	0.07	85.1	0.04	100
AM015	2	0.01	0.01	0.80	14.7	0.05	0.01	84.0	0.02	100
AM020	5	0.02	0.02	0.65	13.4	0.03	0.04	85.8	0.04	100
Hami003	10	0.01	0.01	0.52	6.20	0.02	0.01	93.2	0.01	100
Hami004	6	0.01	0.01	0.70	6.10	0.03	0.02	93.1	0.01	100
Kumtag014	7	0.02	0.01	1.10	9.80	0.02	0.03	88.9	0.02	100
Hami005	5	0.01	0.01	0.50	6.30	0.01	0.02	93.1	0.01	100

及 AM027 的化学组成相似。它们橄榄石 Fa 值范围在 23.9~24.5 之间, PMD 在 1.0~3.4 之间; 低钙辉石 Fs 值范围在 20.2~20.6 之间, PMD 在 1.6~3.2 之间; AM008、AM011、AM015 和 AM020 铁纹石 Co 含量(%)范围在 0.65~0.80 之间, PMD 在 8.0~15.4 之间。

Hami004 的橄榄石 Fa 值为 23.1(22.6~24.2), PMD 为 2.4。低钙辉石的 Fs 值为 18.5(17.6~19.6), PMD 为 4.2。铁纹石 Co 含量(%)为 0.70(0.59~0.79), PMD 为 11.8。

Hami003 和 Hami005 化学组成相似。它们的橄榄石 Fa 值的变化范围为 18.2~20.8; 平均 Fa 值分别

为 18.8 和 19.2; PMD 分别为 2.0 和 3.2。低钙辉石 Fs 值的变化范围为 16.0~17.8, 平均 Fs 值分别为 16.5 和 17.0, PMD 分别为 3.5 和 1.0。铁纹石 Co 含量(%)变化范围为 0.31~0.62, 平均值分别为 0.52 和 0.50, PMD 分别为 10.1 和 6.1。

### 3 10 块陨石的化学-岩石类型划分

陨石的分类方法和标准主要以 Van Schmus *et al.*<sup>[12]</sup>提出的化学-岩石学分类体系为基础, 同时参考其他普通球粒陨石的分类资料<sup>[13-16]</sup>。普通球粒陨



石的化学群划分,依据橄榄石的 Fa 值(H 群 16.9~20.4、L 群 21.0~26.0、LL 群 26.6~33.0)、辉石的 Fs 值(H 群 15.7~18.1、L 群 18.7~22.6、LL 群 23.2~25.8)以及铁纹石 Co 含量(H 群 0.4~0.5、L 群 0.6~1.1、LL 群 1.5~3.0)。Van Schmus *et al.*<sup>[12]</sup>依据陨石的岩石矿物学特征(球粒的清晰程度、基质的重结晶程度、橄榄石和低钙辉石的成分均一程度)将普通球粒陨石的岩石类型划分为 3—7 型。其中 3 型为非平衡型陨石,经历了最低程度的热变质和水蚀变,保存了原始太阳星云的信息,对太阳系的起源、形成和演化等有重要的研究意义<sup>[17-18]</sup>。非平衡型陨石在形成后经历高温热变质作用,球粒逐渐变模糊、基质重结晶程度增强、矿物化学成分趋向均一,转变成 4—7 型的平衡型陨石。依照以上分类方法,本次测定的 10 块陨石分别划分为 H5 型、L5 型和 L3.4 型(表 4)。

3.1 L3 型普通球粒陨石

Kumtag 富集区的 Kumtag014 陨石组成很不均一,橄榄石的 Fa 值和低钙辉石的 Fs 值分布范围宽。但其 Fa 平均值为 25.0,落在 L 群范围内(图 4a);辉石的 Fs 平均值为 17.6,落在 H 群范围内,这可能是由于辉石抵御热变质的能力大于橄榄石,辉石颗粒与细粒富 FeO 硅酸盐颗粒之间缺乏平衡造成的<sup>[19]</sup>;铁纹石 Co 含量平均值为 1.1,也落在 L 群范围内(图 4b),由于金属中 Co 的扩散速度比硅酸盐的 Fe 和 Mg 快,因此对于某些非平衡型陨石尽管橄榄石成分变化大,但其铁纹石成分是均匀的,仍然可以利用铁纹石 Co 含量来划分其化学群。同时, Kumtag014 陨石不透明矿物含量约为 3.2%,与 L 群陨石的金属含量较为吻合<sup>[20]</sup>,综合以上描述, Kumtag014 陨石应为 L 群。

表 4 10 块沙漠陨石的岩石学和矿物学特征

Table 4 Petrography and mineral chemistry characteristics of 10 desert meteorites from Hami, Xinjiang

样 号	类型	不透明矿物 (%)	球粒结构	基质	橄榄石		辉石		冲击程度	风化程度
					平均 Fa	PMD	平均 Fs	PMD		
Hami003	H5	8.5	易分辨	中等重结晶	18.8	2.0	16.5	3.5	S3	W1
Hami005		9.2	易分辨	中等重结晶	19.2	3.2	17.0	1.0	S3	W2
AM007	L5	4.2	易分辨	中等重结晶	24.1	1.0	20.5	2.0	S3	W2
AM008		4.5	易分辨	中等重结晶	24.5	3.3	20.4	2.4	S3	W2
AM011		5.2	易分辨	中等重结晶	23.9	1.6	20.2	1.6	S3	W2
AM015		5.1	易分辨	中等重结晶	24.1	2.3	20.3	3.2	S2	W2
AM020		4.6	易分辨	中等重结晶	24.5	1.8	20.6	2.0	S2	W2
AM027		4.2	易分辨	中等重结晶	24.3	3.4	20.4	3.2	S2	W3
Hami004	L3.4	6.5	易分辨	中等重结晶	23.1	2.4	18.5	4.2	S2	W1
Kumtag014		3.2	非常明显	未重结晶	25.0	51.0	17.6	54.2	S1	W1

注: Fa 和 Fs 分别为同一光片中橄榄石和辉石多次测定的平均值, PMD 表示相对标准偏差

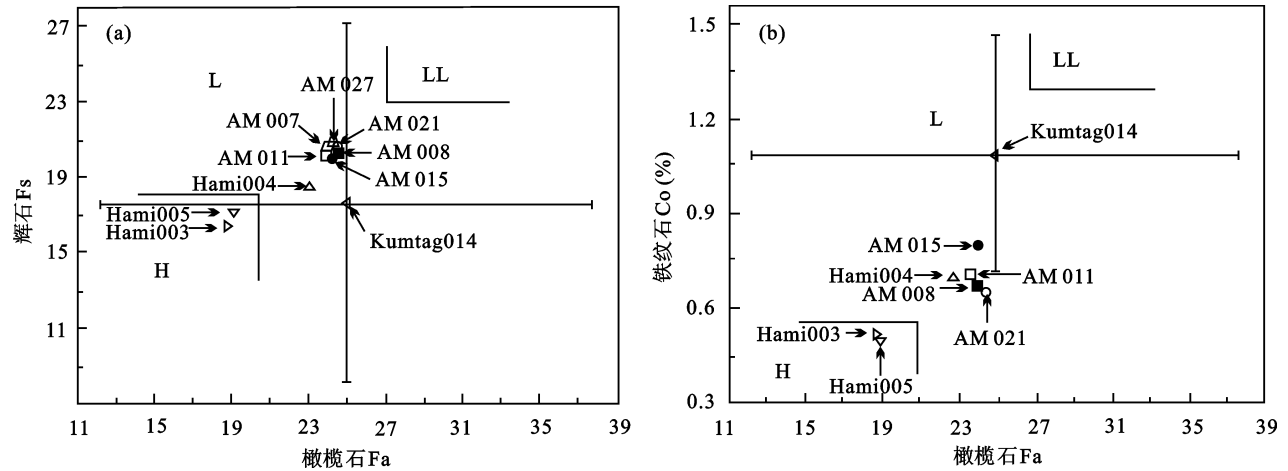


图 4 普通球粒陨石分类图

Fig.4 Classification diagram for ordinary chondrite groups from Hami, Xinjiang

(a)10 块陨石在辉石 Fs-橄榄石 Fa 分类图中的位置; (b)8 块陨石在铁纹石 Co 含量-橄榄石 Fa 分类图中的位置

Kumtag014 陨石球粒非常清晰, 类型多样, 是本次研究的 10 块陨石中较为特殊的惟一 1 块 3 型陨石。图 1b 所示的球粒中, 橄榄石颗粒呈现明显的环带结构, 体现了成分不均一性。这种环带结构的形成是由于在球粒形成的快速冷却和结晶过程中, 组成矿物的离子来不及扩散达到平衡, 同时, 陨石形成后没有经历任何显著的高温事件, 因此这种成分的不均一性才得以保留, 这也是 3 型陨石又被称为非平衡型陨石的原因。尽管非平衡型陨石受到热变质程度影响最小, 但其内部(即不同 3 型陨石之间)存在着热变质程度的差异, 陨石的岩石学和矿物学特征也会存在一定差异。3 型陨石没有或者很少经历后期事件的作用, 包含了更多陨石形成初期的原始信息, 因此进一步将它们进行了次类型划分。

Sears *et al.*<sup>[21]</sup>根据热释光(TL)差异反映 3 型陨石热变质程度, 将它们划分为 3.0—3.9 共 10 个级别。另外, 陨石橄榄石 Fa 值的 PMD、低钙辉石 Fs 值的 PMD、铁纹石的 Co 含量的 PMD 等随着热变质程度的增高也相应地发生变化(即 Fe 在橄榄石和辉石扩散程度以及 Co 在铁纹石中的扩散程度, 与热变质程度相关)。Sears *et al.*<sup>[22]</sup>以橄榄石 Fa 的 PMD 为参数进行了亚类划分, 见图 5。Kumtag014 陨石的橄榄石 Fa 的 PMD 为 51.0(3.4 型: PMD 在 50~60 之间); 由于低钙辉石成分变化太大, Fs 的 PMD 与亚型的对应范围较宽, 因此, Sears *et al.*<sup>[22]</sup>没有确定岩石类型亚型对应确切的确切的 Fs 值的 PMD。但是, 经过与 Sears *et al.*<sup>[22]</sup>的代表性陨石亚型的对比, Kumtag014 陨石 PMD(Fs)对应于 3.0—3.4 型之间, 由于低钙辉石的成分均一性滞后于橄榄石, 造成由低钙辉石 Fs 值的 PMD 对应的亚型一般略低于真实的热变质程度<sup>[23]</sup>, 即其亚型应在 3.4 型及以上。另外, Grossman *et al.*<sup>[24]</sup>发现, 岩石类型在 3.2 型以上, 其橄榄石  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  平均含量小于 0.2, 且标准偏差小于 0.1。Kumtag014 陨石橄榄石的  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  平均含量为 0.07, 标准偏差为 0.08, 因此其亚型应在 3.3 型及以上。综上所述可以确定 Kumtag014 陨石的岩石类型为 3.4 型。

### 3.2 L5 型普通球粒陨石

由图 4 可看出, 除了 Kumtag014 外, L 群普通球粒陨石共 7 块, 包括 AM007、AM008、AM011、AM015、AM020、AM027 和 Hami004, 分别位于 Alatage Mountain(AM)和 Hami 富集区。这 7 块陨石样品中, 除 Hami004 外, 其余 6 块陨石橄榄石的平

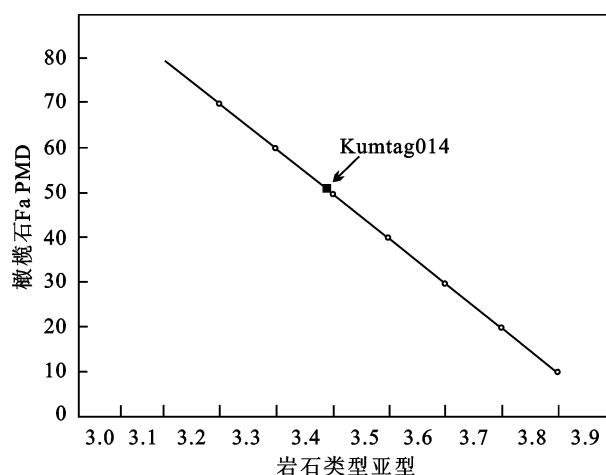


图 5 3 型普通球粒陨石亚类划分(据 Sears *et al.*<sup>[22]</sup>)

Fig.5 Classification of subtypes for type 3 unequilibrated ordinary chondrites based on PMD of Fa

均 Fa 值在 23.9~24.5 之间, 辉石的平均 Fs 值在 20.2~20.6 之间, 落在 L 群范围内; 不透明矿物含量在 4.2~5.2 之间, 也落在 L 群范围内。Hami004 陨石辉石的平均 Fs 值(18.46)略低于 L 群范围, 但其橄榄石 Fa 值为 23.1, 落在 L 群范围内, 其不透明矿物的含量为 6.5, 也在 L 群内。由于 AM007 和 AM027 这两块陨石中的 Fe-Ni 金属在磨片过程中出现脱落, 光片中可分辨的铁纹石颗粒细小, 测得的数据出现较大偏差, 所以未添加这两块陨石铁纹石 Co 含量的数据。AM008、AM011、AM015、AM020 和 Hami004 这 5 块陨石铁纹石 Co 含量(%)的平均值在 0.65~0.80 之间, 在 L 群范围内。综合以上描述, 将这 7 块陨石划分为 L 群。7 块陨石的橄榄石和辉石的成分均一, PMD 分别在 1.0~3.4 和 1.6~4.2 之间, 均小于 5, 且样品球粒轮廓大部分不明显, 只有少量有较清晰的结构和轮廓, 所以将它们的岩石类型定为 5 型。

### 3.3 H5 型普通球粒陨石

Hami 富集区的 Hami003 和 Hami005 两块陨石橄榄石的平均 Fa 值分别为 18.8 和 19.2, 辉石的平均 Fs 值分别为 16.5 和 17.0, 在 H 群范围内; 铁纹石 Co 含量(%)的平均值分别为 0.52 和 0.50, 在 H 群范围内; 不透明矿物含量分别为 8.5%和 9.2%, 在 H 群范围内。综上所述将这两块陨石划分为 H 群。这两块陨石的橄榄石(PMD 分别为 2.0 和 3.2)和辉石(PMD 分别为 3.5 和 1.0)成分均一, PMD 均小于 5, 且样品球粒大部分结构不明显, 部分可分辨轮廓, 所以将它们的岩石类型定为 5 型。

## 4 冲击变质特征

冲击变质效应是陨石的一个基本特征,也是陨石分类工作的重要内容。由于陨石母体在太空中受到其他星体的撞击,通常会引起陨石的矿物产生多种形式的冲击变质效应,因此 Stöffler *et al.*<sup>[25]</sup>等依据样品橄榄石和长石在光学显微镜下的岩相学特征将普通球粒陨石的冲击程度划分为 S1—S6。S1 型,未遭受冲击作用,橄榄石矿物颗粒完整无破碎,无金属熔滴;S2 型,没有明显冲击变质特征,仅经历了非常微弱的冲击变质作用,橄榄石有裂隙,无冲击脉和熔滴;S3 型,出现冲击脉和熔滴;S4 型,橄榄石出现较多面状破裂,出现网状冲击熔脉;S5 型,长石普遍发生熔长石化,广泛发育冲击脉和冲击囊;S6 型,冲击脉边部普遍发育硅酸盐矿物固态重结晶,以出现林伍德石、长石击变玻璃为标志。

根据 10 块库姆塔格普通球粒陨石的矿物特征将它们的冲击变质类型分为 S1、S2 和 S3 型,详见表 4。S1 型 1 块, Kumtag014(图 6a), 橄榄石颗粒完整, 无裂隙, 无金属熔滴; S2 型 4 块, 分别为 AM015、AM020、AM027 和 Hami004, 橄榄石有裂隙, 无金属熔滴; S3 型 5 块, AM007(图 6b)、AM008、AM011、Hami003 和 Hami005, 金属熔滴广泛分布。

## 5 风化程度

风化程度是了解陨石新鲜程度的标志,是陨石分类工作的重要内容。陨石坠落到地球之后,受气

温和湿度等因素影响,遭受风化。Wlotzka<sup>[26]</sup>根据普通球粒陨石中金属与硫化物及硅酸盐矿物的氧化程度,将其风化程度由低到高依次划分为 W0—W6 共 7 种类型。W0 代表刚降落的新鲜样品,未遭受过地球的风化作用影响。W1 表示金属和硫化物边缘有少量褐铁矿(<20%);W2 表示金属中等程度风化,约 20%~60%褐铁矿化;W3 表示金属和硫化物发生强烈风化,约 65%~95%褐铁矿化;W4 表示金属和硫化物几乎全部被取代,但硅酸盐仍未受到影响;W5 表示镁铁质硅酸盐开始氧化,主要沿陨石内部裂隙;W6 表示大范围的硅酸盐被黏土矿物取代。

10 块普通球粒陨石的风化程度普遍较低(表 4): W1 型 3 块,分别为 Hami003(图 7a)、Hami004 和 Kumtag014,这 3 块陨石仅仅在金属周边发生轻微的氧化,褐铁矿<15%;W2 型 6 块,分别为 AM007、AM008、AM011、AM015、AM020 和 Hami005,这些陨石的铁镍金属和陨硫铁有中等程度的风化,表面约 30%~60%发生氧化;W3 型 1 块,AM027(图 7b),Fe-Ni 金属和陨硫铁发生强烈风化,90%以上被氧化成褐铁矿。

## 6 结 论

(1) 根据 10 个库姆塔格陨石的岩相学特征和矿物化学特征进行了球粒陨石的化学群-岩石类型划分,其中 2 个 H5 型: Hami003 和 Hami005; 7 个 L5 型: AM007、AM008、AM011、AM015、AM020、AM027 和 Hami004; 1 个原始类型 L3 型: Kumtag014。

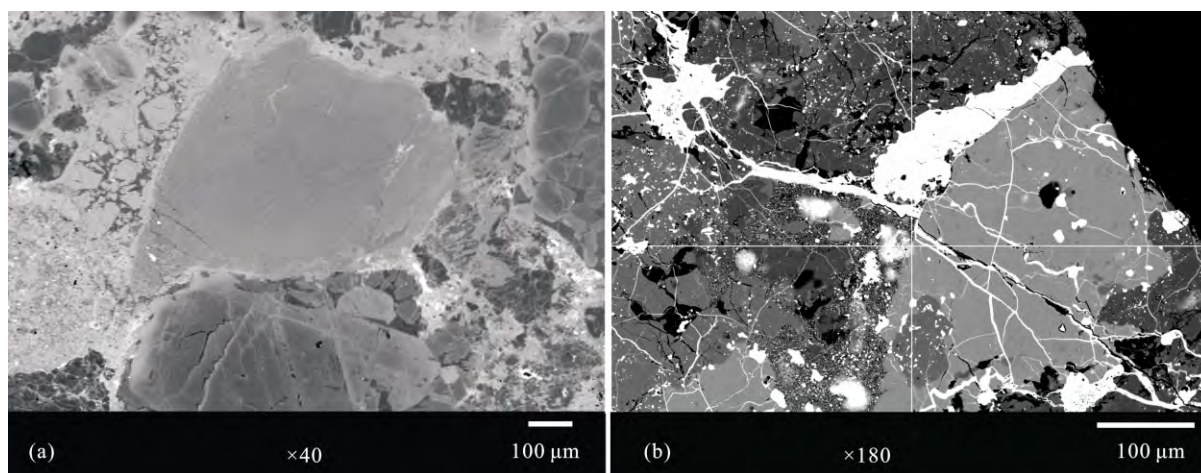


图 6 S1 和 S3 型的冲击变质特征

Fig.6 Micrographs showing the shock metamorphic features of S1 and S3 meteorites from Hami, Xinjiang 背散射照片。(a)Kumtag014(S1), 橄榄石颗粒完整, 无破碎。(b)AM007(S3), 金属熔滴广泛分布



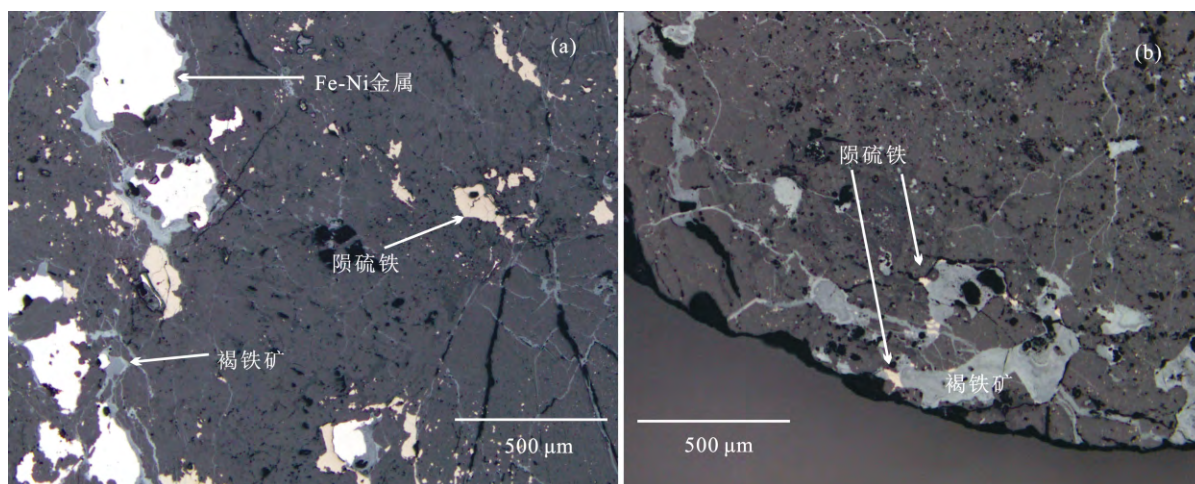


图7 W1型和W3型的风化特征

Fig.7 Micrographs showing the weathering scales of W1 and W3 meteorites from Hami, Xinjiang

反光镜下照片, 白色为 Fe-Ni 金属, 淡黄色为陨硫铁, 灰色为褐铁矿。(a)Hami003(W1), 铁镍金属仅边缘轻微氧化形成褐铁矿边; (b)AM027(W3), 风化作用强, 褐铁矿化>90%

(2) 确定了 L3 型, Kumtag014 的次分类为 L3.4。

(3) 10 块陨石冲击变质程度分别为: 5 块 S3 型 (AM007、AM008、AM011、Hami003 和 Hami005); 4 块 S2 型 (AM015、AM020、AM027 和 Hami004); 1 块 S1 型 (Kumtag014)。

(4) 10 块陨石风化程度普遍较低。其中有 3 块 W1 型 (Hami003、Hami004 和 Kumtag014); 6 块 W2 型 (AM007、AM008、AM011、AM015、AM020 和 Hami005); 1 块 W3 型 (AM027)。

沙漠陨石的收集与南极陨石收集相比成本低, 可以在更大的面积范围内发现和回收, 提高了稀有陨石样品回收的可能性。因此, 我国广阔的戈壁和沙漠区域具有巨大的回收潜力, 沙漠陨石的搜集和研究必将和南极陨石一样, 取得大量原创性成果, 丰富研究样品的类型, 促进我国陨石学和天体化学的发展。

本研究的样品由首次沙漠陨石考察队以下成员共同搜集: 林杨挺研究员、缪秉魁教授、尹庆柱教授、戴德求副教授、李世杰副研究员、沈文杰副教授、胡森博士、王鹏高级工程师、雷克斯、张洁、夏志鹏等。三位匿名审稿人提出了建设性修改意见, 在此一并表示诚挚的谢意!

#### 参考文献(References):

- [1] Scott E R D. Meteorites: An overview[J]. Elements, 2011, 7(1): 47–48.
- [2] Ruzicka A, Grossman J N, Garvie L. The Meteoritical Bulletin, No. 100, 2014 June[J]. Meteorit Planet Sci, 2014, 49(8): E1–E101.
- [3] Gattacceca J, Valenzuela M, Uehara M, Jull A, Giscard M, Rochette P, Braucher R, Suavet C, Gounelle M, Morata D. The densest meteorite collection area in hot deserts: The San Juan meteorite field (Atacama Desert, Chile)[J]. Meteorit Planet Sci, 2011, 46(9): 1276–1287.
- [4] 林杨挺, 王道德. 沙漠陨石[J]. 地质地球化学, 1994, 22(3): 34–38.  
Lin Yang-ting, Wang Dao-de. The desert meteorites[J]. Geol Geochem, 1994, 22(3): 34–38 (in Chinese with English abstract).
- [5] Bischoff A, Geiger T. Meteorites from the Sahara: Find locations, shock classification, degree of weathering and pairing[J]. Meteoritics, 1995, 30(1): 113–122.
- [6] Schlüter J, Schultz L, Thiedig F, Al-Mahdi B, Aghreb A. The Dar al Gani meteorite field (Libyan Sahara): Geological setting, pairing of meteorites, and recovery density[J]. Meteorit Planet Sci, 2002, 37(8): 1079–1093.
- [7] Hofmann B, Gnos E, Zurluh F, Giscard M, Jull A, Weber P, Al Busaidi S. Oman Meteorite Search Project 2001–2009: Status and Summary[J]. Meteorit Planet Sci, 2009, 72(suppl): 5225.
- [8] Bevan A, Bland P, Jull A. Meteorite flux on the Nullarbor region, Australia[J]. Geol Soc London Spec Publ, 1998, 140(1): 59–73.
- [9] Rubin A E, Verish R S, Moore C B, Oriti R A. Numerous unpaired meteorites exposed on a deflating playa lake at Lucerne Valley, California[J]. Meteorit Planet Sci, 2000, 35: A181–A183.
- [10] Weisberg M K, Smith C, Benedix G, Herd C D, Righter K, Haack H, Yamaguchi A, Chennaoui Aoudjehane H, Grossman J N. The meteoritical bulletin, No.97[J]. Meteorit Planet Sci, 2010, 45(3): 449–493.

- [11] 缪秉魁, 王道德. 南极格罗夫山陨石的分类及其研究意义[J]. 极地研究, 2008, 20(2): 95–104.  
Miao Bing-kui, Wang Dao-de. Classification of meteorites from the Grove Mountains and its significance[J]. Chinese J Polar Res, 2008, 20(2): 95–104 (in Chinese with English abstract).
- [12] Van Schmus W, Wood J A. A chemical-petrologic classification for the chondritic meteorites[J]. Geochim Cosmochim Acta, 1967, 31(5): 747–765.
- [13] 王道德, 侯渭, 陈永亨. 普通球粒陨石矿物学分类参数的研究[J]. 科学通报, 1989, 34(19): 1483–1484.  
Wang Dao-de, Hou Wei, Chen Yongheng. Studies of mineralogical classification parameters of ordinary chondrites[J]. Chinese Sci Bull, 1989, 34(19): 1483–1484 (in Chinese).
- [14] 王道德, 陈永亨. 我国普通球粒陨石岩石学、化学组成及分类的研究[J]. 地球化学, 1991, 20(1): 13–26.  
Wang Dao-de, Chen Yong-heng. Petrology and chemistry of ordinary chondrites from China and their classification[J]. Geochimica, 1991, 20(1): 13–26 (in Chinese with English abstract).
- [15] Huss G R, Rubin A E, Grossman J N. Thermal metamorphism in chondrites[M]//Lauretta D S, McSween H Y Jr. Meteorites and the Early Solar System II. Tucson: The University of Arizona Press, 2006: 567–586.
- [16] 王道德, 王桂琴. 普通球粒陨石的物理和岩石学性质及其分类参数[J]. 地球化学, 2011, 40(1): 35–44.  
Wang Dao-de, Wang Gui-qin. Physical and petrologic properties of ordinary chondrites and their taxonomic parameters[J]. Geochimica, 2011, 40(1): 35–44 (in Chinese with English abstract).
- [17] Ruzicka A, Snyder G A, Taylor L A. Mega-chondrules and large, igneous-textured clasts in Julesberg (L3) and other ordinary chondrites: Vapor-fractionation, shock-melting, and chondrule formation - Constraints on chondrule-forming processes[J]. Geochim Cosmochim Acta, 1998, 62(8): 1419–1442.
- [18] 戴德求, 王道德, 王桂琴. 南极格罗夫山 100 块陨石的矿物-岩石学特征[J]. 极地研究, 2008, 20(2): 153–166.  
Dai De-qiu, Wang Dao-de, Wang Gui-qin. Petrography, mineral chemistry and classification of 100 meteorites from the Grove Mountains, Antarctica[J]. Chinese J Polar Res, 2008, 20(2): 153–166 (in Chinese with English abstract).
- [19] 沈文杰, 胡森, 林杨挺, 缪秉魁. 荷叶塘陨石岩矿特征及化学-岩石类型研究[J]. 极地研究, 2013, 25(4): 386–393.  
Shen Wen-jie, Hu Sen, Lin Yang-ting, Miao Bing-kui. Chemical and petrologic study of the heyetang meteorite[J]. Chinese J Polar Res, 2013, 25(4): 386–393 (in Chinese with English abstract).
- [20] Holland H D, Turekian K K. Treatise on Geochemistry (Vol.1)[M]. Amsterdam: Elsevier Pergamon, 2004: 146.
- [21] Sears D W, Grossman J N, Melcher C L, Ross L M, Mills A A. Measuring metamorphic history of unequilibrated ordinary chondrites[J]. Nature, 1980, 287(5785): 791–795.
- [22] Sears D W, Grossman J N, Melcher C L. Chemical and physical studies of type 3 chondrites — I: Metamorphism related studies of Antarctic and other type 3 ordinary chondrites[J]. Geochim Cosmochim Acta, 1982, 46(12): 2471–2481.
- [23] 缪秉魁, 林杨挺, 欧阳自远, 周新华. 南极格罗夫山陨石岩石学特征—I: 非平衡型 L3 型普通球粒陨石[J]. 极地研究, 2002, 14(2): 276–287.  
Miao Bing-kui, Lin Yang-ting, Ouyang Zi-yuan, Zhou Xin-hua. Petrology of Grove Mountains meteorites I: L3 ordinary chondrites[J]. Chinese J Polar Res, 2002, 14(2): 276–287 (in Chinese with English abstract).
- [24] Grossman J N, Brearley A J. The onset of metamorphism in ordinary and carbonaceous chondrites[J]. Meteorit Planet Sci, 2005, 40(1): 87–122.
- [25] Stöffler D, Keil K, Scott E R D. Shock metamorphism of ordinary chondrites[J]. Geochim Cosmochim Acta, 1991, 55(12): 3845–3867.
- [26] Wlotzka F. A weathering scale for the ordinary chondrites[J]. Meteoritics, 1993, 28(3): 460.